Lecat, Maurice

Atome et cosmos

Astron
L

MAURICE LECAT

Atome et Cosmos

Première Partie

LIBRARY
SEP 23 1931
UNIVERSITY OF TORONTO

LOUVAIN
IMPRIMERIE "Établissements F. CEUTERICK„
66, RUE VITAL DECOSTER, 66
—
1931

Astron
L

MAURICE LECAT

Atome et Cosmos

Première Partie

LOUVAIN
IMPRIMERIE "Établissements F. CEUTERICK„
66, RUE VITAL DECOSTER, 66

1931

Extrait de la *Revue des Questions scientifiques*

4me série, t. XIX, 1931, 3.

ATOME ET COSMOS

Ce fut un immense progrès dans les connaissances humaines que réalisa, au temps de Thalès (6e s. av. J.-C.), la découverte de la rotondité terrestre. Mais non moins considérable fut l'œuvre de Copernic, révélant, en 1542, que notre Globe n'est pas, au sens physique, un astre privilégié, et affranchissant ainsi l'esprit humain du préjugé géocentrique (1).

Une troisième révolution, encore plus profonde, s'est opérée au cours de notre génération.

Les conceptions fondamentales qu'avait le XIXe s. sur la Nature physique sont beaucoup trop étroites pour pouvoir expliquer tous les phénomènes. Elles ne sont adéquates qu'à l'échelle humaine, c'est-à-dire aux domaines des dimensions moyennes. Ceci est révélé : pour le Grand, par la théorie einsteinienne de la Relativité, qui nous oblige à transformer nos notions d'espace et de temps ; pour le Petit, par la théorie des Quanta, qui impose de nouvelles conceptions de la Matière et de la Loi.

(1) Le texte omet les détails. D'après un passage de Théophraste, Platon, devenu vieux, se serait repenti d'avoir donné à la Terre la place centrale dans l'Univers. Aristarque de Samos (vers 280 av. J.-C.) soutenait déjà le système héliocentrique. Mais Hipparque, le plus grand astronome de l'Antiquité, le rejeta, ce qui fit tomber la tentative dans l'oubli pendant de longs siècles.

Suite nécessaire des deux premières révolutions, la découverte de la Relativité a montré que l'amalgame de l'espace et du temps, dans lequel nous nous mouvons, ne répond pas du tout à l'intuition que nous en donne notre vie concrète ; mais les divergences ne sont sensibles que pour les domaines cosmiques. Sans bornes, l'espace n'est pas infini : il est courbe et fermé (la somme des angles d'un triangle n'est pas deux droits). Quant au temps, il comporte une indétermination essentielle ; le temps absolu n'existe pas.

Les événements du micro-univers n'ont pas la continuité que nous observons macroscopiquement : « l'atomicité » est la règle, non seulement pour la matière, mais aussi pour les radiations (en particulier, pour la lumière), etc. L'évolution de l'Univers se fait par pulsations. En outre, la causalité et le déterminisme n'étant pas rigoureux, la notion de loi naturelle perd son sens strict et n'a plus qu'un sens « statistique ».

L'atome, qu'on s'était représenté à l'image d'une compacte boule de billard, l'atome est relativement plus vide que le système solaire (1).

Ajoutons que la matière est réductible à l'énergie et qu'en un sens, ce n'est que de l'électricité qu'il y a dans l'Univers. Cependant il est terriblement compliqué. Tout s'agite sans trêve ; par ex., les molécules d'une eau dormante sont dans un état de mouvement auprès duquel n'est rien celui d'un essaim de moucherons tourbillonnants.

Les théories de la Relativité et des Quanta transforment, de fond en comble, nos conceptions de l'Univers. Les cadres traditionnels de la Pensée ont été considérablement élargis.

La conviction se fait jour, chez les initiés, que la révolution scientifique va modifier aussi la conception de la vie humaine. Ainsi s'exprime J. Jeans (1930). Certes, à des questions de ce genre : « Que dois-je faire ? », la Science, qui, pour une raison logique, ne s'exprime jamais à l'impératif, ne pourra fournir de réponse. Mais elle peut exercer

(1) Pour Eddington (1928), le grand coupable du « bolchevisme de la Science moderne », ce n'est pas Einstein (auteur de l'arrangement nouveau de l'espace et du temps), c'est Rutherford, qui a révélé la grande porosité de l'atome. « Univers ayant son firmament », suivant le pressentiment admirable de Pascal.

indirectement une influence psychologique. La preuve, c'est que la plupart des philosophes, dans l'exposition de leur doctrine, qu'il s'agisse d'Éthique ou de pure théorie de la Connaissance, débutent par une esquisse de la vision du Monde.

Les révélations scientifiques heurtent les idées les plus généralement reçues. Bien des profanes imputent au savant une manie de spéculation, une fantaisie de compliquer les choses, en vue d'« épater » ! Mais ce qui, à beaucoup, apparaît, de nos jours, comme le produit bizarre de quelques esprits détraqués, sera de plus en plus favorablement accueilli par la génération suivante et sera bientôt incorporé au patrimoine de Culture général. De même, quand nous sommes enfants, la rotondité terrestre et l'antigéocentrisme nous choquent, d'abord ; et puis nous nous y faisons vite. « Il arrivera un temps, dit Eddington (1922), où la révolution einsteinienne finira par être classée parmi les banalités de l'éducation ordinaire. »

Mais aux non-scientifiques — à ceux surtout dont la vie se partage entre le bureau ou l'usine et les quelques heures de repos —, les conquêtes récentes de la Science ne vont-elles pas demeurer désespérément inaccessibles, comme les glaciers éternels ? Surtout s'il s'agit de la Physique, discipline toute farcie d'une terminologie spéciale et de formules abstraites. N'est-elle pas affaire exclusive du savant, c'est-à-dire de l'édificateur de Science? Peut-on la rendre accessible aux autres hommes et peut-elle avoir de l'attrait pour eux ?

A cette dernière question, une réponse positive est faite par le savant H. Reichenbach (1) — « le philosophe de la Relativité » — et il justifie péremptoirement son avis par

(1) Nous l'avons déjà dit, la solide réputation scientifique de REICHENBACH (1891-) s'est établie rapidement, grâce à l'abondance et à la haute qualité de sa production en philosophie scientifique. Nous avons signalé naguère ses ouvrages ; mais nous devons aussi mentionner son pénétrant article : « Ziele und Wege der physikalischen Erkenntnis » dans le t. IV du *Handbuch der Physik*, dont il constitue la base critériologique. Et nous ajouterons que Reichenbach a fondé et dirige, avec R. CARNAP, *Erkenntnis* (Leipzig), périodique dont l'objet est de promouvoir la théorie de la Connaissance.

le passionnant ouvrage (1) où il met en lumière la pensée physique d'à-présent, ses principales conquêtes et quelques-unes de leurs conséquences philosophiques.

Certes il ne peut être question que le profane s'intéresse à des particularités, sans portée générale, telle que la découverte d'une cent dix millième variété de coléoptère. Mais ce qui suscitera son intérêt, c'est la magnifique vue panoramique que lui offre Reichenbach sans recourir à aucun appareil mathématique et avec une technique expérimentale très simple.

La façon la plus naturelle et la plus utile de faire l'analyse de ce beau livre nous semble consister à en produire un raccourci, avec, ci et là, quelques réflexions ou additions (2).

L'introduction (n° 1) émet des considérations générales. On y explique notamment par quels moyens les conquêtes scientifiques modernes ont pu s'écarter si fort des données de l'expérience quotidienne.

Chez le savant, la soif de connaître et de comprendre est plus ardente et surtout d'autre qualité que chez le profane. Qu'y a-t-il d'étonnant à ce qu'un esprit impatiemment curieux, avidement scrutateur et armé des puissantes ressources de la Physique contemporaine, dévoile des choses qui paraissent trop compliquées, voire saugrenues, à la raison naïve et inculte ?

(1) Atom und Kosmos. Das physikalische Weltbild der Gegenwart, von Hans REICHENBACH, Professor an der Universität Berlin. — Un volume de 323 pages (19×13), avec 18 fig. dans le texte et 3 planches. — Berlin, Deutsche Buch-Gemeinschaft, 1930.

(2) Nous devrons faire, ci et là, des critiques, mais peu graves. En voici déjà deux, de portée générale. Les dates sont rares et l'une d'elles est fausse : p. 140, au lieu de 1899, il faut 1889. (Hertz n'a pu conférencier en 99, étant mort en 94 !). L'index alphabétique n'est pas fort soigné. D'abord Hamilton n'est pas en place, ni Gay-Lussac, qui est appelé Lussac Gay ! Ensuite, il y a des lacunes, et de deux sortes. Des noms propres manquent, notamment Ph. Lenard, W. Ramsay et J. B. Richter, qui sont cependant mentionnés dans le volume. Enfin, pour beaucoup de mots de l'index, les renvois ne sont pas complets ; par exemple : Maxwell n'est pas cité qu'à la page 125, mais aussi aux pp. 143, 159, 240 ; et pour les *Beugungserscheinungen*, à 130, il faut adjoindre 161 et 273.

La technique moderne confère à nos sens obtus une acuité incomparable pour l'observation de la Nature. Par l'expérimentation, notre puissance d'investigation est encore fort accrue. Il y a l'étude qualitative et quantitative des faits ; puis la découverte de lois. Mais la science n'a pas pour objet ultime de collectionner le plus possible de lois. Au contraire, les théoriciens, les codificateurs s'efforcent, par une méditation pénétrante, à remplacer les lois connues par d'autres moins nombreuses et plus compréhensives. Cette substitution, c'est l'*explication*. Si la loi newtonienne de la Gravitation est explicative, c'est parce que, en une seule formule, elle embrasse celles de Copernic, de Galilée et de Kepler. Ce dernier stade de l'investigation peut seul nous donner une vision du Monde.

La PREMIÈRE PARTIE (n^{os} 2-5) est intitulée « Espace et Temps ».

Consacré à l'Espace , le n° 2 esquisse d'abord la question des géométries. A une g. mathématique, on ne demande que d'être logique (c'est-à-dire sans contradiction *interne*), comme l'est p. ex. celle d'Euclide. Le rejet (légitime) de l'axiome des parallèles conduit aux g. *non-euclidiennes*. La première en date est celle de Bolyai-Lobatchevski, généralisée par Riemann. Il conçut un espace qui est à l'euclidien ce que la surface courbe est au plan, les éléments « différentiels » des *espaces riemanniens* jouissant des propriétés euclidiennes. C'est une application de la « méthode d'extension continue » (*Verfahren der stetigen Erweiterung*).

Parmi ces g., il faudra discriminer celle réalisée par la Nature (cf. n° 5) ; car si la Mathématique est la science du possible, la Physique est la science du réel. Contrairement à ce qu'a cru Kant, l'organisation de notre esprit n'a rien à y voir. Du reste, il est faux que notre intuition soit nécessairement euclidienne.

Une surface en forme de chapeau, p. ex., pourrait être considérée comme plane, en admettant que, par le transport, l'étalon de longueur varie adéquatement ; mais on pose la *Zuordnungsdefinition* qu'il se conserve. De cette convention définitoire, ne résulte pas d'indétermination pour la *géométrie physique* ; bien au contraire, la structure de l'espace devient affaire de connaissance objective.

Plus étroitement que l'Espace, le Temps (n° 3) est lié à notre esprit. Notre corps est une construction temporo-spatiale, mais le cours de la Pensée ne se fait que dans un ordre temporel. Suivant R., on est allé trop loin dans l'opposition entre les temps psychologique et physique.

C'est, en général, en spatialisant le temps qu'on le mesure (1). On dit souvent que le Soleil a une marche irrégulière ; ce qui n'a pas de sens, car il n'y a pas d'uniformité objective. Comme au n° 2, l'égalité des durées doit faire l'objet d'une convention. Indétermination dans la description, non dans le fait.

Nécessitée par les progrès de la Physique, la critique relativiste a démontré que seule la causalité détermine l'ordre O de succession temporelle d'événements (2). Il n'y a pas de temps absolu, car il n'y a pas d'action à distance. La vitesse d'un message ne peut se déterminer qu'en moyenne, sur un circuit fermé. D'où la relativité de la simultanéité. Il est des événements pour lesquels O est indéterminé (3). R. ajoute que seule l'investigation concrète de la Nature — et non la pure méditation sur la structure de la Raison — pouvait conduire à une telle connaissance. Quelle déformation les gens de « bon sens » lui ont fait subir !

Le n° 4 est consacré à la relativité du mouvement (m.), soutenue déjà par Leibniz, contre S. Clarke (représentant Newton). Cinématiquement, il est clair que le m. absolu

(1) La meilleure horloge physique, c'est l'atome (cf. n° 16).

(2) Sur ce point, comme sur d'autres, les conceptions de R. s'écartent de celles de A. S. EDDINGTON, exposées, d'une manière très élémentaire, dans son ouvrage : La nature du monde physique, Paris 1929 (trad. de l'anglais, 1928). Suivant celui-ci (voir le remarquable chap. IV), la *flèche du temps* est déterminée par l'accroissement de l'entropie (cf. ici le n° 10) de l'Univers, c'est-à-dire par l'augmentation de l'effet du hasard. Ce n'est qu'ultérieurement (ch. XIV) que l'illustre savant de Cambridge fait intervenir la causalité, ou plutôt la « causation ». La conception de R. nous paraît la meilleure, mais nous engageons le lecteur à étudier les deux exposés.

(3) L'exposé de cette question par R. (dans Atom und Cosmos) est moins complet que celui d'Eddington (*l. c.*, ch. III), qui est cependant, lui aussi, très élémentaire. E. introduit le cône (double) du *passé absolu* et du *futur absolu*, cône dont tout l'extérieur représente le *présent absolu* ou mieux l'*ailleurs absolu*.

n'a pas de sens. Mais la thèse de Newton a une base dynamique. Non pas qu'il argue des forces causant le m.; c'est l'apparition de « forces d'inertie » — produites dès qu'il y a accélération — qui serait le critère du m. absolu.

E. Mach, le premier, objecta que le soulèvement, vers les bords, d'un liquide en rotation dans un seau, n'a pas à être attribué à la force centrifuge plutôt qu'à la gravitation de l'univers autour du liquide. Ce savant a constaté ainsi que la conception relativiste du m. nécessite une nouvelle théorie de la gravitation. C'est Einstein qui l'a édifiée. Voici son *principe de relativité* : tous les phénomènes physiques qui ont lieu dans un système doivent être indépendants de son mouvement.

Abordons la Mécanique céleste (n° 5). Alors que la Dynamique classique est en désaccord avec le système de Ptolémée, la théorie d'Einstein rend compte, elle, et des orbites képlériennes et des épicycles. On ne peut donc plus opposer la réalité du système de Copernic à la fausseté de celui de l'*Almageste* : la vérité est à un niveau supérieur.

Tout système de référence attaché à un corps en m. libre, p. ex. la « cage d'Einstein », est *localement* « inertique » ; d'où le *principe d'équivalence* (P. É.) du m. et du champ gravifique (ch. gr.). Mais, en grand, c'est plus compliqué : différence essentielle entre les Mécaniques einsteinienne et classique. Il a fallu un nouvel instrument : le Calcul tensoriel. Le P. É. fournit des relations infinitésimales, d'où, par intégration, Einstein tire des lois valables dans tout domaine.

Cette théorie a fait des prévisions qui se sont confirmées. En vertu du P. É., un rayon lumineux (r. l.) est curviligne, aussi bien dans un ch. gr. que dans la cage en accélération. C'est la *déflexion einsteinienne*. De même, un ch. gr. produit un *effet Einstein*, équivalent à l'effet Doppler du m. d'une source : les raies spectrales sont déplacées vers le rouge.

Einstein a dû faire usage de la g. riemannienne (n° 2), les masses cosmiques détruisant l'euclidité de l'espace ou plutôt du quadridimensionnel *espace-temps*. Mieux : sa courbure est identique au ch. gr. Pénétrant partout, il supprime l'action à distance. Einstein a calculé que la gravitation se propage avec la vitesse de la lumière (cf. n° 6).

L'attraction newtonienne ne rend pas compte, exactement, des m. célestes, p. ex. du *déplacement du périhélie de Mercure* sous l'influence perturbatrice des autres planètes. La Relativité, elle, conduit au nombre observé : 3me éclatante confirmation de la théorie d'Einstein.

A l'aide de la télescopie photographique, notre œil plonge profondément dans le Cosmos, non pas *contemporain*, mais diversement lointain dans le passé. R. esquisse la vision émouvante que nous en donne l'Astronomie d'à présent : système local, galaxie, nébuleuses extragalactiques (parmi lesquelles les plus rapprochées sont les Nuées de Magellan et, à un million d'« années de lumière », la grande nébuleuse d'Andromède) (1).

L'Espace est fini, fermé et sans bornes « sphérique » (au sens de l'*Analysis Situs*) (2). Comme la lumière fait le « tour d'Univers », chaque étoile a deux images, mais correspondant à deux stades de son évolution et à des positions différentes. L'une d'elles nous échappe (3) : pour sonder tout

(1) Nébuleuse représentée dans la planche liminaire, mal réussie, Voir les admirables planches de « L'Univers » de Jeans (Paris. 1930), en particulier IV.

(2) Homologue de la circonférence et de la sphère, l'espace physique peut être conçu, abstraction faite du temps, comme étant l'hypersurface appelée hypersphère. La difficulté de représentation ne réside pas dans l'adjonction, mais au contraire dans la suppression — finale — d'une dimension, l'évanouissement de l'intérieur et de l'extérieur de la multiplicité hypersphérique conférant la non-euclidité. Il importe de ne pas assimiler la finitude du volume de l'espace à celle du *volume* de la Terre. C'est parce que Maeterlinck est tombé dans ce piège qu'il n'a rien compris du tout. « On nous apprend, dit-il, que l'Univers est une sphère (!) finie... ce qui est raisonnablement moins compréhensible que l'infini absolu (!), proprement dit... pur et simple, sans restrictions.... Il nous faut admettre l'infini... N'espérons pas que jamais une lunette atteigne la grande muraille (!) qui sépare l'Univers du néant » !

(3) R. est ici un peu trop affirmatif. En adoptant la cosmologie due à de Sitter — que R. passe sous silence —, on a pu soutenir que deux nébuleuses (h. 3433 et M 83) pourraient n'être que deux de nos « voisines » (M33 et M31), vues, après que leur lumière a fait le tour de l'Univers, quand on braque le télescope dans la direction opposée (Jeans, l'Univers, p. 75). Le télescope de Pasadena, qui aura 5 m de diamètre, tranchera peut-être la question.

l'Univers, la portée de nos plus puissants télescopes est encore au moins cent fois trop faible.

R. ne dit rien de la grandeur de l'Univers. La méthode de la constante cosmologique conduit à 40 milliards de parsecs (un parsec = 3,25 année-lumière = 206 mille fois les 150 millions de km de la distance Terre-Soleil).

On peut le regretter, l'auteur ne consacre à l'univers stellaire guère que 1 p. c. de l'étendue de son livre. L'Astrophysique, la genèse et la fin de l'Univers méritaient amplement qu'il s'y arrête, au moins chemin faisant, dans son exploration de la Physique (1). L'intérêt du livre eût encore été accru, et sans démentir le titre (Atom *und Cosmos*). Du reste, les récents ouvrages — si émouvants — de Jeans et aussi d'Eddington y invitaient. De ces auteurs illustres, nulle trace dans le livre de R. !

La SECONDE PARTIE (nos 6-9) a pour titre « Lumière et Radiation » et le n° 6 : « la nature radiante de la lumière ».

Notre perception — directe — de la lumière nous en donne une connaissance subjective ; cette sensation est distincte de l'agent physique, aussi objectif, lui, que l'électricité. Gœthe ne l'a pas compris. Parce que la sensation de lumière blanche est unitaire, la théorie newtonienne de la dispersion est qualifiée par lui de « ... *ein Ratten- und Eulennest* » ! Ajoutons que Newton avait écrit que « la poésie est un ingénieux non-sens »...

Trois noms émergent ici : Rœmer, pour la détermination de la vitesse *c* de la lumière (constante naturelle fondamentale en Physique) ; Newton ; Galilée, pour l'invention si précieuse du télescope (2). 1667, 1704, 1610.

(1) De l'auteur de ces lignes, paraîtra, dans deux ou trois mois, un petit ouvrage essayant d'exposer, à grands traits, la Physique d'à présent et ses conséquences philosophiques. Tout en étant à la portée d'un grand public, il est d'un caractère un peu moins élémentaire que le livre de R. et le Cosmos y est envisagé avec les notions astrophysiques qu'il comporte. On y trouvera un choix de références bibliographiques, parmi les plus importantes, destinées aux lecteurs qui désireraient approfondir, dans les meilleures conditions, l'étude de tel ou tel chapitre de la Physique.

(2) En réalité, le premier télescope a été construit, non par Galilée, mais par un opticien flamand : Lippershey (en 1608).

La nature de la lumière ? On doit à Newton (R. omet Démocrite) une « *Dingtheorie* », à Huygens et à Fresnel une « *Vorgangstheorie* ». Plus tard (n° 9), il y aura un rapprochement. D'accord avec la loi d'inertie de Galilée, l'hypothèse de l'émission corpusculaire triompha au XVIII^e s. Cependant seule la nature ondulatoire (ce n° 7) — plus compliquée — peut rendre compte : 1) de l'interférence (ignorée d'Huygens, découverte par Th. Young) ; 2) du fait que c décroît avec la densité optique (ce qui contredit la thèse de Newton) ; 3) de la diffraction. Dans la théorie des instruments tels que le télescope, l'Optique géométrique suffit tant que l'objet et l'image sont grands par rapport à la longueur d'onde λ, sinon il faut l'Optique ondulatoire. Fresnel en a donné la théorie mathématique complète. Elle établit la transversalité des ondes, seule capable d'expliquer l'optique cristalline. Si Huygens n'avait songé qu'aux longitudinales, c'est parce qu'il faut un support aux ondes et que, dans un fluide élastique, la transversalité est impossible. Mais pour Fresnel l'éther est solide !

Au XIX^e s., de nombreuses expériences — R. n'en décrit que deux — ont été faites en vue de confirmer l'existence de l'éther. Quand un objet s'y meut, y a-t-il entraînement ? Partiel, suivant Fresnel, ce que Fizeau trouva quantitativement d'accord avec les faits. Mais cela fut mal interprété. Si souvent renouvelée, la célèbre expérience de Michelson répond négativement, en prouvant l'isotropie de propagation de la lumière. Conclusion : on ne doit pas, comme l'ont fait Fresnel et W. Thomson, rattacher l'Optique à une Mécanique de l'éther. Plusieurs générations se sont efforcées d'édifier, plus généralement, une Physique mécanique. Projet voué à l'échec. Nous y reviendrons (n° 9).

« La nature électrique de la lumière » fait l'objet du n° 8. Ayant mis sous la forme mathématique les conceptions de Faraday, Maxwell put donner à la théorie ondulatoire un tour nouveau, en réunissant l'Électricité (1) et l'Optique. Cela perdit son caractère hypothétique le jour où H. Hertz (1888) mit en évidence des ondes, à l'aide d'une bouteille de Leyde et de son *résonnateur*, vrai « œil électrique ». Ses

(1). Il serait plus exact de dire *électromagnétisme*. Mais à ce mot R. substitue toujours *électricité* et nous respecterons sa terminologie.

ondes n'ayant que quelques mètres, il put montrer leur similitude avec celles de la lumière.

R. s'occupe alors de l'échelle des radiations, où λ varie de 50 km à un dix-milliardième de mm (1). D'abord viennent donc les ondes hertziennes, puis les r. infrarouges, les r. l., les ultraviolets, les r. X (ou de Röntgen), les r. γ, le r. cosmique (*Höhenstrahlung*).

Pour déterminer λ chez les r. X, le procédé de Hertz et celui de diffraction par un réseau ligné échouent. En 1912, M. von Laue trouva dans un cristal (assemblage régulier de molécules) un réseau à r. X tout préparé par la Nature. De la disposition des taches sur la photographie, il déduit λ par le calcul. Mais pour les r. γ, la structure cristalline est encore trop grossière.

Le r. ultra-γ, le plus pénétrant, est d'origine nébulaire. Pour le produire au laboratoire, il faudrait une tension de 800 millions de volts !

Les r. l. à part, de toutes ces radiations, nous n'avons qu'une connaissance indirecte. La cécité, dit R., ne nous empêcherait pas d'investiguer la Nature, en particulier l'Univers stellaire ; l'image télescopique d'une étoile pourrait se traduire par un son, comme les ondes hertziennes. Le pur physicien ignore les limites du spectre visible. L'erreur de Gœthe apparaît ici encore plus nettement qu'au n° 6.

Conçu comme champ électrique, l'éther a perdu les propriétés mécaniques de la substance macroscopique : impénétrabilité et état de m. par rapport à un corps donné. Faut-il conserver le nom d'éther ? Affaire de sentiment. Le résultat négatif de l'expérience de Michelson perd son caractère paradoxal. Cela est lié à la notion (n° 3) de simultanéité (2).

Nous arrivons au dernier stade : celui de « la nature matérielle de la lumière » (n° 9), sur laquelle il convient de s'étendre un peu. Avec Hertz, on a, jusqu'au début de ce siècle, considéré comme indubitable la nature purement

(1) C.-à-d. 0,001 U. A. (ångström), unité que R. n'utilise pas et qui est à peu près le diamètre de l'atome d'H.

(2) Pour une analyse approfondie de cette notion, R. renvoie, avec raison, à son excellente « Philosophie der Raum-Zeit-Lehre », ouvrage qui a fait l'objet d'un article dans cette *Revue* (sept. 1928, pp. 253-277).

ondulatoire des radiations. Impossible semblait la découverte d'un phénomène en contradiction avec elle. On s'est trompé. Il n'est pas question de rejeter complètement la théorie ondulatoire pour reprendre, telle quelle, la conception corpusculaire newtonienne. Les deux seront unies en une forme supérieure, suivant le processus hegelien : de la thèse et l'antithèse, à la synthèse. Un cas en a déjà été constaté ici (n° 5), à l'occasion du système du Monde (de Ptolémée, par Copernic, à Einstein). Au n° 8, on a dématérialisé l'éther ; la nouvelle évolution conceptuelle, en plusieurs étapes, matérialise, elle, la lumière.

Maxwell avait déjà annoncé et calculé la pression de radiation. Einstein confère à l'énergie lumineuse : inertie et pesanteur. La masse inertique est le rapport de l'énergie du r. l. au carré de *c*. Déjà admise par Newton, l'attribution de pesanteur se justifie, dans la Relativité, par la déflexion einsteinienne (n° 5).

La conception des Quanta va plus loin. Le conflit entre la Physique newtonienne et celle de Fresnel a éclaté sur leur frontière commune : la question des échanges d'énergie entre matière et radiation. Ce problème conduisit M. Planck, en 1900, à l'hypothèse des Quanta, qui a ouvert une ère nouvelle de la Science. L'échange se fait, en quelque sorte, atomiquement, par *quantum d'action*. C'est une *constante* universelle, dite *de Planck*. Elle vaut $6{,}55.10^{-27}$ ergs-secondes. (L'action est le produit de l'énergie par le temps). Le quantum d'énergie des ondes électriques est proportionnel à la fréquence de la source, chaque couleur ayant donc son quantum.

Le succès de cette conception met en défaut des théories classiques. Échec double, car on démontre que l'émission ne pourrait pas être discontinue si le m. des particules matérielles, dans la source, avait lieu suivant la Mécanique newtonienne (cf. n° 16) ; celle-ci est donc ébranlée aussi bien que l'Optique de Fresnel.

Planck n'avait fait l'hypothèse des Quanta que pour l'émission ou l'absorption lumineuse, non pour la radiation. En 1905, Einstein fit un pas de plus, en soutenant que les ondes ont une structure discontinue et en aiguilles *(nadelartig)*, étant constituées de *photons*. Ce qui a suggéré cette

conception à Einstein, c'est la *photoélectricité* (R. semble s'exprimer incorrectement à ce sujet). A l'état normal, les électrons — plus petites particules d'électricité négative (v. nos 12 et 15) — ne sortent pas de la matière : pour les en arracher, il faut une certaine énergie. L'expulsion a lieu si l'on projette une radiation de fréquence suffisante. On pouvait s'attendre à ce que la vitesse des photoélectrons fût fonction de l'intensité ; mais elle ne dépend que de λ. L'intensification du faisceau incident ne fait qu'augmenter le nombre d'électrons arrachés. Seule la théorie photonique peut expliquer ce phénomène et elle le fait quantitativement.

Seconde confirmation, encore plus éclatante. Lorsque la matière est irradiée de r. X, elle en éparpille une partie. Contrairement à la prévision, ces r. X, dits *secondaires*, n'ont pas même λ que les r. X incidents. La diffusion diminue le pouvoir pénétrant, donc augmente λ. C'est en 1922 que le phénomène fut précisé par A. H. Compton. En 1923, il en a proposé une théorie, basée sur les photons. A ce sujet R. omet de citer P. Debye. Il est surtout regrettable qu'il passe sous silence Ch. V. Raman. Ce professeur, de Calcutta, s'est demandé si un phénomène analogue à l'effet Compton ne se produirait pas dans le spectre visible. Ayant étudié la diffusion de la lumière par les liquides et les vapeurs, il découvrit, en 1928, que la réponse est positive : il y a un *effet Raman*.

La photoélectricité et l'effet Compton-Raman sont révélés par des expériences *macroscopiques*, c'est-à-dire portant sur un grand nombre de phénomènes élémentaires, dont on observe seulement les résultats globaux. L'évolution des conceptions sur la nature de la lumière est un exemple instructif du processus de la découverte physique. Si l'on calcule l'effet macroscopique d'une hypothèse faite sur le micro-univers, on peut obtenir de celle-ci une justification indirecte, en attendant une preuve directe.

Pour la théorie photonique, on en a trouvé récemment : on est parvenu à faire plusieurs expériences *microscopiques*. Si la plus petite lumière directement perceptible est de 17 photons, un seul suffit cependant pour obtenir un effet observable, savoir : le recul d'un électron projetant un photon. Effet prévu par la théorie de Compton-Debye.

En utilisant une méthode de Wilson (n° 13), dite des *traînées d'ionisation*, il est possible de prendre une photographie. On y reconnaît des trajectoires très courtes, le long d'un faisceau X primaire ; Compton précise leur identification avec les traces des électrons de recul. Leur énergie cinétique, déduite de la longueur de ces traces, s'accorde avec la théorie. Compton, en 1925, a même réussi, peut-on dire, à photographier directement les deux effets du choc entre l'électron et le photon, savoir : la trajectoire de l'électron de recul et la direction D du rayonnement diffusé. Car il arrive que le photon secondaire rencontre un autre électron et, par effet photoélectrique, le mette en mouvement. Les débuts des deux trajectoires déterminent D.

Le fait qu'il existe des corpuscules de lumière renverse la conception purement ondulatoire de Huygens, Fresnel, Maxwell et Hertz. Bien entendu, les phénomènes de diffraction et d'interférence témoignent de l'existence d'ondes. Une dualité de nature paraît donc s'imposer. Il manque une théorie unitaire. L'Optique est impuissante, à elle seule, à résoudre la difficulté, qui provient de ce que notre macroscopisme habituel nous donne une idée trop simpliste de la constitution de la matière. Il faut donc, de celle-ci, une nouvelle théorie.

Nous l'exposerons dans un second et dernier article. Par le concours de la Chimie, de la Physique et de la Radioactivité, on y verra que, comme les radiations, la matière aurait — mais dans un sens tout spécial — une nature ondulatoire.

De ce rapide voyage dans le domaine des sciences physiques, nous essayerons de dégager quelques conclusions philosophiques : sur la concaténation des causes, en relation avec la probabilité, sur le réel et la vision du monde.

(A suivre).

———

REVUE DES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

PUBLIÉE PAR

LA SOCIÉTÉ SCIENTIFIQUE DE BRUXELLES

ASSOCIATION SANS BUT LUCRATIF

Cette revue, fondée en 1877 par la Société scientifique de Bruxelles, se compose actuellement de trois séries : la **première série** comprend 30 volumes (1877-1891) ; la **deuxième**, 20 volumes (1892-1901) ; la **troisième**, 30 volumes (1902-1921). La livraison de janvier 1922 inaugura la **quatrième série**.

La revue paraît six fois par an depuis 1928. Chaque livraison renferme trois parties principales.

La **première partie** se compose d'**Articles originaux**, où sont traités les sujets les plus variés se rapportant à l'ensemble des sciences mathématiques, physiques, naturelles, sociales, etc.

La **deuxième partie** consiste en une **Revue des Revues et des Publications périodiques.**

La **troisième partie** consiste en une **Bibliographie scientifique**, analyse critique des principaux ouvrages scientifiques récemment parus.

Chaque livraison contient ordinairement aussi un ou plusieurs articles de **Variétés.**

CONDITIONS D'ABONNEMENT

L'abonnement est payable annuellement avant la fin de février. Il court jusqu'à ordre contraire.

Le montant en est fixé temporairement comme suit :

Belgique et Grand-Duché de Luxembourg	**80 francs belges**
France	**75 francs français**
Autres pays	**26 belgas**

Les abonnements demandés en France et dans les colonies françaises sont payables aux « *Presses Universitaires de France* » *Paris*. Toutefois les personnes déjà abonnées avant 1924 sont priées de continuer à s'acquitter, soit directement, soit par l'intermédiaire de leur libraire, au *Secrétariat de la Société scientifique, à Louvain.*

Pour tout ce qui concerne la **Rédaction**, *s'adresser au Secrétariat de la Revue, Collège St Jean-Berchmans, Eegenhoven (Louvain).*

*Pour ce qui concerne l'***Administration**, *en tous pays autres que la France et ses colonies, s'adresser au Secrétariat de la Société scientifique, 2, rue du Manège, Louvain. Compte chèques postaux n° 202746.*

*Pour tout ce qui concerne l'***Administration** *en France et dans ses colonies, s'adresser aux « Presses Universitaires de France », 49, boulevard St-Michel, Paris, V. Chèques postaux 392-33.*

Louvain. — Établissements CEUTERICK, rue Vital Decoster, 66.

MAURICE LECAT

Atome et Cosmos

Deuxième Partie

LOUVAIN
IMPRIMERIE "Établissements F. CEUTERICK„
66, RUE VITAL DECOSTER, 66

1931

ATOME ET COSMOS

MAURICE LECAT

Atome et Cosmos

Deuxième Partie

LOUVAIN
IMPRIMERIE "Établissements F. CEUTERICK„
66, RUE VITAL DECOSTER, 66

1931

Extrait de la *Revue des Questions scientifiques*,
tome XX, 20 septembre 1931.

ATOME ET COSMOS

A PROPOS D'UN OUVRAGE RÉCENT

(Suite et fin)

Ayant traité (1) de l'Espace et du Temps, ensuite des Radiations, abordons la TROISIÈME PARTIE (nos 10-17) de l'ouvrage de Reichenbach, consacrée à « la Matière ».

La théorie « atomique » présente trois aspects : physique (n° 10), chimique (nos 11, 13) et — il manque un mot — disons « subatomique » (nos 12, 14-17) ; aspects correspondant à trois catégories de corpuscules, respectivement : molécules, atomes, enfin électrons et protons.

La haute antiquité de l'atomisme s'explique : il est basé sur des constatations simples : flexibilité, compressibilité, etc. Démocrite, au Ve s. av. J.-C., prétendait donner l'explication causale et mécanique des choses par l'entre-choquement des atomes. Mais l'hypothèse atomique n'est devenue une certitude qu'au XIXe siècle, et a été suivie — ajoutons-le — du *néo-atomisme*.

Considérons donc d'abord « la molécule, agent élémentaire des phénomènes thermiques » (n° 10). L'étude de ceux-ci conduisit à la *théorie cinétique de la chaleur* de Clausius, qui,

(1) Voir cette *Revue*, mai 1931, pp. 467-480.

identifiant (1) le calorique au travail de l'agitation moléculaire, a fait œuvre explicative importante. On pourrait comparer : un gaz à un essaim d'abeilles, un liquide à l'intérieur mouvementé de la ruche, un solide à une forêt secouée par le vent. La théorie cinétique a permis d'expliquer quantitativement les propriétés des trois états. Mais l'argument péremptoire en sa faveur est d'avoir rendu évident le *premier principe de la Thermodynamique* (Mayer), dont la généralisation est le *principe de conservation de l'énergie*. La transformation de travail en chaleur (par frottement) est une pulvérisation d'énergie, suractivant l'agitation moléculaire.

Les phénomènes thermiques sont irréversibles : un corps cède toujours de la chaleur à un moins chaud. D'où un nivellement des températures, compensation dont le degré *(Ausgleichungsgrad)* est mesuré, d'une manière pratique, par l'*entropie*. Le *second principe* dit que l'entropie croît toujours. L. Boltzmann l'interpréta cinétiquement, la compensation *moyenne* résultant d'une mixtion des vitesses des molécules. Le principe devient donc une loi *statistique*, applicable seulement à une collection nombreuse de molécules. Ainsi fut posée la question capitale du caractère des lois naturelles. R. eût pu citer ici W. Gibbs.

L'entropie est donc liée à une probabilité d'un état thermique. Mathématiquement, « improbable » et « impossible » sont toujours distincts. Souvent la vie quotidienne les identifie : on ne craint pas la tuile en embuscade sur le toit et qui parfois, nous tombant sur la tête, en prouve la non-identité ! Sous peine d'inexister, les sciences physiques doivent considérer comme impossibilité des probabilités suffisamment petites (2), comme, par ex., celle de la démix-

(1) R. insiste : il ne s'agit pas d'une relation de cause à effet, mais d'identité ; objecter que calorique et mouvement produisent des sensations distinctes, est sans valeur. POINCARÉ (1905) — duquel se rapproche Eddington, — était d'avis différent : « Quand une théorie prétend nous apprendre ce qu'est la chaleur... elle est condamnée d'avance ». Pour MEYERSON (Identité et Réalité, Paris 1927), comprendre, c'est identifier. Cf. H. FEIGL (1929).

(2) Dans une Note des *C. R. Acad. Sc. Paris* (t. 190, 1930, p. 537), É. BOREL montre que les probabilités qui s'expriment par un nombre inférieur à 10 puissance — 1000 sont non seulement négligeables

tion de l'oxygène et de l'azote dans un cc d'air. Probabilité inférieure à celle de voir qu'une armée de singes, tapant inintelligemment sur des machines à écrire, ne dactylographient la bibliothèque du *British Museum* ; probabilité si petite que toutes les papeteries du monde ne suffiraient pas à l'écrire en décimales. Le physicien en est convaincu : l'air de son laboratoire ne subira pas la démixtion (qui le ferait asphyxier ici, comburer là) ; et R. demande qu'il admette, avec le même optimisme, la loi de l'entropie (1).

dans la pratique courante de la vie, mais *universellement* négligeables, c'est-à-dire doivent être traitées comme rigoureusement égales à zéro dans toutes les questions qui concernent notre univers. Le fait qu'elles ne sont pas effectivement nulles peut éventuellement intéresser le métaphysicien ; pour le savant, elles *sont* nulles et les phénomènes auxquels elles se rapportent sont absolument *impossibles*. Chose curieuse, cette conclusion choque surtout les non-mathématiciens !

(1) Si quelqu'un prétendait avoir vu une source froide céder de la chaleur à une chaude, bien que ce ne soit pas théoriquement impossible, É. Borel (Le Hasard) demanderait son internement ! — Il peut être intéressant de comparer les idées de R. et celles d'Eddington (1928), qui sont assez divergentes. A cet effet, le mieux, peut-être, est de confronter leurs exposés de la question de l'entropie. Voici donc un bref résumé de celui d'E. La propriété d'avoir un sens unique, une « flèche », appartient au temps (cf. nos 3, 18), mais non à l'espace. L'image spéculaire du monde n'a rien d'absurde ; mais si l'on retourne la flèche du temps — comme l'a fait Wells dans « The Time-Machine » —, le drame de l'Univers tourne à la plus insensée des farces, et qui ne le voit est affligé d'un intellect à reculons. Entre le passé et le futur, il y a une distinction plus profonde qu'entre gauche et droite. Cette irréversibilité du flux temporel est ignorée des lois de la Physique, sans exclure celles de la Relativité et des Quanta. Fait seule exception : la loi de l'entropie. Sans elle, rien n'aurait représenté le « devenir » dans le monde physique. Les maniaques du rationalisme — R. n'est pas du nombre ! — auraient sans doute déclaré que c'est une illusion, comme tout ce que la science est incapable d'inventorier, par exemple : la beauté, la vie, l'âme. La notion d'entropie a donc considérablement élargi nos conceptions. Cette conquête — l'une des plus grandes contributions du XIXe siècle à la philosophie scientifique — a marqué une réaction contre l'idée fausse que tout ce qui mérite l'attention de la science serait découvert par une dissection microscopique des objets. Un tel inventaire serait incapable de faire connaître *l'organisation*. Étudier à fond « un » ne suffit pas pour faire connaître « deux », bien que « un » et « un » fassent « deux ». On ne peut négli-

Considérons maintenant « l'atome comme agent élémentaire des réactions chimiques » (n° 11). Ce qui, en Chimie, a conduit à l'atomisme, c'est la *loi de Richter-Dalton*, de proportions pondérales définies dans les combinaisons (1799), complétée par la *loi des proportions multiples* (1807). Gay-Lussac et A. von Humboldt, combattus en cela par Dalton, découvrirent (1808) que, pour l'état gazeux, les rapports volumétriques, dans les combinaisons, sont toujours simples. D'où la fondamentale *loi d'Avogadro* (1811), qu'un volume donné de gaz renferme le même nombre de molécules, quel que soit le gaz. On en déduit, par pesée, les rapports des poids atomiques. La Chimie est ainsi devenue science exacte et a pu prendre un développement gigantesque. L'analyse d'un corps consiste à déterminer les diverses sortes d'atomes de la molécule, puis leurs nombres, enfin, à l'aide de diverses sciences auxiliaires (p. ex. la photochimie), leurs positions relatives.

La théorie cinétique (n° 10) a montré que le diamètre de l'atome est de l'ordre de l'angström ; la loi d'Avogadro, que le nombre d'atomes dans l'*atome-gramme* de tout élément est $60{,}6 \times 10^{22}$, *constante d'Avogadro*. Ajoutons que J. Perrin, dès 1912, a montré que pas moins de 13 procédés conduisent au même nombre. Les vérifications saisissantes ne sont pas rares dans la microphysique !

ger le « et », qui est l'organisation. E. fait une juste comparaison avec la peinture. Il ne faut pas regarder la Joconde au microscope ! S'il fallait, dit-il, ranger en deux catégories : distance, masse, entropie, beauté, mélodie, il y aurait des raisons de mettre l'entropie avec les deux dernières ; si seule l'entropie a pu prendre place parmi les indigènes du monde physique, c'est parce qu'elle a le mot de passe arithmétique. Si le physicien rationaliste fulmine contre le sens de la beauté, E. lui chuchote à l'oreille : « entropie » ! Heureusement que cette entité — un *absolu*, au sens de la Relativité — s'était assuré, dès le début, dans la Physique, une place solide, grâce au parrainage des ingénieurs, appui d'autant plus important qu'à cette époque on attribuait la Création à un Technicien (et pas encore à un Mathématicien, infiniment profond). — La flèche du temps ne peut être retournée, mais bien supprimée, le temps continuant à exister et à avoir de l'étendue comme l'espace. C'est le cas de l'intérieur d'une étoile en « équilibre thermodynamique ». Quand l'univers atteindra cet état, son entropie ne pourra plus croître : ce sera la mort thermique du Cosmos, sa mort tout court.

Un *élément* est, par définition, indécomposable *chimiquement*. Les éléments sont-ils sans lien entre eux? Les classant par croissance du poids atomique et les disposant suivant certaines colonnes, Mendeleëff et L. Meyer, en 1869, ont découvert le *système périodique*. Ne tenant pas la périodicité — inexpliquée — pour l'effet du hasard, Mendeleëff s'en servit pour annoncer, triomphalement, plusieurs substances. Aujourd'hui, la périodicité est élucidée (v. n° 15).

« L'électron, grain d'électricité » : tel est l'objet du n° 12. La *loi de Faraday*, sur l'électrolyse, correspond à la loi de Richter-Dalton pour la matière (v. n° 11). Il y a toujours proportionnalité entre la quantité d'électricité qui traverse le bain et le poids de substance décomposée ; le poids en gr. d'un élément libéré par 96.540 coulombs est le rapport du poids atomique à la valence. Helmholtz en a conclu qu'aux atomes sont attachés des grains d'électricité. G. Stoney les appela *électrons*.

Bientôt fut confirmée cette nouvelle atomicité. L'électricité négative fut isolée de la matière, par décharge à travers des gaz raréfiés : un torrent d'électrons s'échappe de la cathode, constituant les *rayons cathodiques* (Crookes, 1879). Leur trajectoire rectiligne est courbée par l'aimant, ce qui prouve la nature corpusculaire de ces rayons ; mais ce n'est pas de la matière, c'est de l'électricité « matérielle » (*stofflich*). La courbure a permis de calculer la masse de l'électron : le 1840^{me} de celle de l'atome d'hydrogène (H). Quant à la charge, elle est précisément ce qu'avait révélé l'électrolyse.

L'électricité positive, elle, n'est pas séparable de la matière. On peut bien obtenir des rayons positifs ou *rayons canaux* (Goldstein, 1886), cheminant en sens inverse des cathodiques, mais la masse de leur particule est celle de l'atome du gaz présent.

Le torrent cathodique est un pur courant. Dans un conducteur, le phénomène est compliqué par le frottement des atomes ; d'où la résistance. Pour certains métaux, près du zéro absolu brusquement elle se réduit au dix-milliardième de la primitive ! Dans cet état de *superconductivité*, un courant se maintient des heures après la cessation de la cause. C'est Kamerlingh-Onnes qui a découvert ce phénomène, vers 1920, dans son laboratoire cryogénique (à Leyde).

L'apaisement de l'agitation thermique ne suffit pas à l'expliquer (v. n° 16).

Il restera à démontrer que les atomes contiennent bien les électrons (v. n° 15).

L'atome matériel existe-t-il réellement ? E. Mach et P. Duhem, physiciens, M. Berthelot et W. Ostwald, chimistes, ont été antiatomistes ! L'atomisme leur parut une hypothèse utile, mais irréelle et dont il faut se défier, une spéculation alchimique. Berthelot devait y voir « une religion » ! Devenant de plus en plus petites, les particules ne perdent pas leur réalité et c'est une erreur de rejeter, comme l'a fait Duhem, la méthode inductive (v. n° 19) (1). Les méthodes les plus diverses concordant au sujet de la grosseur de l'atome, les antiatomistes furent confondus (2).

On trouva, du reste, la confirmation directe. Voir l'atome lui-même, impossible — la lumière étant de λ trop grande —, de même le photographier à l'aide d'un microscope pour rayons γ (v. n° 17). Mais on peut observer des effets sur un petit nombre d'atomes ou même sur un seul.

En nous faisant voir le *mouvement brownien*, le microscope nous révèle le frémissement thermique et, par là, l'existence des molécules. Les petites parcelles solides sont animées d'une folle agitation (3). R. Brown, qui découvrit ce phénomène (4), en 1827, fut loin de se rendre compte de sa signification. Si les parcelles sont assez petites, les chocs que leur donnent les molécules du milieu sont trop rares pour qu'il y ait *équilibre statistique*. La théorie décisive, d'accord avec les faits, fut édifiée par Einstein (1905) et M. Smoluchowski

(1) Au début du siècle, les *énergétistes* méprisaient les atomistes, « gens qui prétendaient *deviner* comment l'Univers était fait ».

(2) « Il nous semble, pour ainsi dire, que nous voyons les atomes, depuis que nous savons les compter » (Poincaré, 1912).

(3) Voici une manière originale de l'observer. La Grenouille porte près de la racine des nerfs spinaux, des sachets blancs contenant des rhomboèdres de carbonate de calcium. Avec un scalpel, il est facile d'en mettre dans une goutte d'eau, sous la lamelle du microscope. On voit les gros immobiles, les petits agités, surtout les plus petits.

(4) Déjà auparavant, Spallanzani l'avait entrevu.

(1906) (1). Ajoutons que J. Perrin a montré le prodigieux enchevêtrement de la trajectoire (2).

Le *spinthariscope* montre l'action d'atomes isolés. Lancés par un radioélément (v. n° 14), ils bombardent, à la manière d'une mitrailleuse, un écran en sulfure de zinc. A chaque choc, se produit un petit éclair qu'on peut voir avec un dispositif spécial.

Enfin, Ch. Th. R. Wilson observe ions, atomes, électrons, grâce au sillage de condensation que détermine leur trajectoire dans l'air humide, qu'une détente brusque sursature. On peut photographier ces traînées de brouillard (cf. n° 9).

En conclusion, l'atomicité existe non seulement pour les radiations (n° 9), pour l'action (n° 9) et pour l'électricité (n° 12), mais aussi pour la matière.

La radioactivité et la désintégration, tels sont les objets du n° 14. — Deux grandes découvertes, dues au hasard : *a)* celle des rayons X (n° 8), par Röntgen, en 1895 ; irradiés par l'anticathode (v. n° 12), ils sont produits *artificiellement* ; *b)* celle, faite en 1896, par H. A. Becquerel, qui constata que l'Uranium (Ur) émet *spontanément* une radiation comparable aux rayons X (3). L'intérêt des radiations mystérieuses fut ainsi éveillé. Ce qui fit alors découvrir le Radium (Ra), par P. Curie et M^me^ (1898), c'est le fait que la pechblende, minerai d'Ur, est plus radioactive que l'Ur pur. En même temps, on y trouva le Polonium (Po). Bientôt on découvrit toute une série d'autres *radioéléments*, dont le roi, en quelque sorte, est le Radium. On prophétisa une révolution technique. Quelle erreur ! Scientifique, oui : le voile de la structure de la matière a pu être un peu soulevé.

Les radiations émises (spontanément) sont de trois sortes, dites α, β, γ. Seuls les rayons γ sont analogues aux rayons X.

(1) Mort, fauché par la guerre, en 1917.

(2) Il est impossible de l'obtenir fidèlement par des photographies, même prises à intervalles très rapprochés, et ainsi la vitesse n'est pas mesurable. Aussi E. et S. ont-ils dû choisir, comme grandeur caractéristique de l'agitation, le segment rectiligne qui unit le point de départ au point d'arrivée en un temps donné, sans s'occuper de l'enchevêtrement.

(3) Ajoutons que cette propriété fut découverte déjà un demi-siècle plus tôt, par Niepce de Saint-Victor ; mais dédain et scepticisme, tel fut son sort.

Comme les rayons cathodiques, les β sont formés d'électrons, mais lancés à une vitesse qui peut voisiner *c*. Peu pénétrants, les rayons α correspondent aux rayons canaux. Un gr de Ra émet 35 milliards de *particules* α par seconde (Regener, 1908) (1). Comme le rayonnement se maintient dans l'H liquide, son énergie n'est pas d'origine thermique, mais provient d'une dématérialisation partielle (v. nº 9). La technique parviendra-t-elle à dématérialiser intégralement l'atome ? L'explosion d'un seul déterminerait celle de la Terre ! Heureusement, l'allumette ne sera pas facile à trouver : elle devrait communiquer la température d'une dizaine de millions de degrés !

Les combinaisons du Ra étant aussi radioactives que le métal, la radiation vient de l'*intérieur* de l'atome. Rutherford (1904) démontre que les α sont des atomes d'Hélium (He). La Nature réalise donc spontanément des transmutations, rêve des alchimistes. Cette découverte n'a pas produit d'Or ; elle a fait mieux : elle a promu la connaissance de l'Univers.

Il existe deux *familles de radioéléments*, dont Ur et Th (le Thorium) sont les souches. C'est à Rutherford et à F. Soddy — non cité par R. — qu'on doit la théorie de la désintégration spontanée (1903) et la détermination de la généalogie et de la descendance du Ra. En émettant des α, le Ra, de poids atomique 226, donne le Radon (Rn), de poids atomique 222 : la différence (soit 4) est le poids atomique de He. On mesure la *vie* d'un radioélément par la durée τ de désintégration de la moitié de la masse initiale ; on procède ainsi, vu la logarithmicité du phénomène. Pour Ra, τ est de 1750 ans, mais de quatre jours pour Rn. Projetant aussi des α, Ra donne Ra A, qui vit quelques minutes. La série continue, passant par Po. Quant à la souche, c'est Ur *(Ur-Ahn !)*, de tous les éléments celui de plus grand poids atomique et qui vit 6 milliards d'années.

On peut calculer, en fonction du temps, la composition de la masse provenant de la transformation de l'Ur et inver-

(1) L'émission d'α est montrée par un appareil de Rutherford. En utilisant des *audions*, on fait entendre à tout un auditoire le bruit de la projection.

sement. D'où la durée des périodes géologiques par le dosage de He ou de Pb dans les roches (1).

Que l'atome ait une structure (n° 15), cela est prouvé par la désintégration, par l'émission de radiations et par l'existence d'*atomes ionisés* (v. n° 16).

Rutherford, le premier, construisit un *modèle atomique*. Il est à l'image du système planétaire : les électrons-planètes sont maintenus en équilibre par révolution autour d'un *noyau* (soleil), chargé positivement. Conception hardie ! Oui, le travail du physicien est intuitif. Mais la méthode de la Physique est rigoureusement critique (2). D'innombrables autres schémas ont dû être abandonnés.

Égal à la charge du noyau, dans l'atome neutre, le nombre des électrons-planètes est le *nombre atomique*. C'est lui qui détermine les propriétés chimiques ; aussi a-t-il remplacé le poids atomique dans le système périodique (n° 11) (3). Le nombre atomique est 1 pour l'atome H, système Terre-Lune ; 2 pour He, 3 pour Li, ..., 82 pour Pb, 88 pour Ra, 92 pour Ur (à la fin du système périodique). Il reste à trouver les éléments de nombre atomique 85 et 87. Le manque de stabilité des atomes à nombre atomique élevé est prouvé par la radioactivité ; mais il n'est pas impossible qu'on trouve un jour des atomes plus lourds que Ur (4).

La radioactivité prouve que le noyau, lui aussi, a une structure. Le noyau d'H est appelé *proton*. En général, un noyau renferme un nombre de protons égal au poids atomique et un nombre d'*électrons nucléaires* égal à l'excès de ce poids sur le nombre atomique. Ces électrons constituent les particules β (v. n° 14). Les autres sont dits ~~périphériques~~ planétaires. Le noyau d'He a 2 électrons de chaque espèce.

(1) On peut aussi se baser sur la couleur de l'auréole polychroïque de certains micas : elle est due à He.

(2) Soyons, dit Pasteur, aussi hardis dans la conception de l'hypothèse que rigoureux dans sa démonstration expérimentale.

(3) Ajoutons que les *n. a.* se déduisent des spectres X par une célèbre *loi de Moseley* (1913), vraie base du s. p. Le génial Moseley est mort, en 1915, à l'âge de 28 ans, fauché par la guerre. — Pour placer les radioéléments dans le s. p., il y a deux *lois de Soddy, Russel et Fajans*, qui indiquent le déplacement subi par un élément quand il expulse une particule α ou une β.

(4) Ils existent probablement à l'intérieur des étoiles.

Des éléments de même nombre atomique sont dits *isotopes* (Soddy), parce qu'on leur donne même position dans le système périodique. Leurs propriétés, à l'exclusion de celles qui tiennent à la masse, sont identiques. Ce qui fit découvrir l'isotopie (1), c'est l'impossibilité d'assigner à chaque radioélément une place distincte, vu leur nombre. Soi-disant de poids atomique 207, le Pb ordinaire (tiré de la galène) est un mélange de deux isotopes : l'un de poids atomique 206, dernier descendant de l'Ur ; l'autre, de poids atomique 208, terme final de Th. Une *pléiade* comprend jusqu'à une dizaine d'isotopes. Le Mg en a trois, de poids : 24, 25, 26. En 1927, Aston a confirmé l'isotopie pour 57 éléments. Cette propriété a eu du mal d'être admise. Elle ne simplifie pas la Chimie ; mais elle est précieuse pour l'étude des noyaux.

Le rayonnement α prouve que le noyau d'He préexiste dans les noyaux supérieurs.

En 1920, Rutherford, en bombardant, avec des rayons α, l'atome N ou d'autres atomes légers, a provoqué des désintégrations artificielles, libérant des noyaux d'H, constatés par scintillement.

Thalès de Milet (VI^e^ s. av. J.-C.) eut l'idée d'une substance primitive : idée juste, mais, au lieu de l'eau, c'est l'H, comme l'avait supposé J. L. Proust, en 1815. Il se basait sur ce que les poids atomiques semblent multiples de celui d'H. En réalité, il y a une petite divergence, à cause de l'équivalence de la masse et de l'énergie (n° 9).

Le diamètre du noyau est environ un cinquante-millième de celui de l'atome. Le vide relatif est donc aussi prononcé dans le microcosme que dans le système solaire. La compacité apparente tient aux forces de liaison.

La distinction entre le proton et sa charge ne se justifie

(1) Ajoutons que l'isotopie est révélée par le *spectrographe de masse* de Thomson-Aston, qui permet de déterminer le poids atomique. On soumet les rayons canaux à un champ électrique et à un champ magnétique, normaux à la direction de ces rayons. Ceux-ci dévient suivant des paraboles, dont la courbure est fonction du poids atomique. — Sous le bombardement cathodique, les isotopes émettent des rayons X de même fréquence, d'accord avec la loi de Moseley (v. note 3 de la page précédente).

plus : le proton est donc l'atome d'électricité positive. La masse étant de nature électrique, ce n'est donc pas la Mécanique qui est à la base des sciences physiques, — comme on l'avait cru au XIX^e siècle —, mais c'est l'Électricité (1).

Le modèle de Rutherford laisse dans l'ombre la disposition et le mouvement des électrons périphériques. N. Bohr associa ce modèle à la théorie des Quanta. D'où une « légalité » (2) semi-classique du mécanisme atomique, objet de ce n° 16.

Contrairement au rayonnement thermique (n° 10), la radiation propre *(Eigenstrahlung)* permet de « regarder » *dans* l'atome. Mais, pour qu'il l'émette, il doit y être excité, étant placé, p. ex., dans une flamme (3). Ce rayonnement fournit un *spectre discret* (4) et chaque élément a son système spécifique de longueurs d'onde λ.

(1) On pourrait regretter que R., ayant exposé la structure de l'atome, n'ait pas ouvert ici une parenthèse astro-physique. Comment la chaleur stellaire s'entretient-elle ? La réponse est basée sur l'âge des étoiles : cinq trillions d'années (Jeans, 1928). La combustion (explication enfantine des Anciens), la chute de météorites (Mayer), la contraction (Helmholtz et Lord Kelvin), les combinaisons chimiques (Faye) sont des explications fausses. Il ne reste que l'origine subatomique. La radioactivité (Soddy, 1919) et la formation d'He à partir d'H (J. Perrin, 1919) ont fait place à l'anéantissement mutuel des électrons et des protons dans les atomes de nombre atomique supérieur à 92, cette matière se résolvant en radiations cosmiques (v. n° 8). Astres « que leur propre lumière dévore incessamment » (Musset) ! — Quant à l'évolution stellaire, elle s'explique par l'ionisation graduelle. Par exemple, l'atome moyen du Soleil n'a conservé que 2 des 95 électrons périphériques primitifs ; cet astre n'a plus à subir que sa dernière transformation catastrophique ; cela se produira dans... un trillion d'années (Jeans, 1927). — Quand l'atome est dépouillé de tous ses électrons planétaires, il est devenu incapable de vibrer et n'émet plus de lumière.

(2) Mauvaise traduction de « *Gesetzlichkeit* ». La pauvreté de la langue est responsable.

(3) Selon qu'on opère à la flamme (2000°), à l'arc électrique (4000°), ou à la température dite de l'étincelle (5000°), on obtient trois spectres différents (sp. de flamme, d'arc, d'étincelle), qui, chacun, permettent l'identification de l'élément, à peu près comme des photographies prises de face, de trois-quarts, ou de profil.

(4) Nous ne dirons rien des *spectres à bandes* continues, dus aux molécules. Le spectre de radiateur intégral est *continu*.

Il s'agirait de déduire les spectres des données sur la structure de l'atome. Avant Bohr, la spectroscopie (1) ne consistait guère qu'en un énorme matériel empirique. Supposant que les électrons vibrent, et s'appuyant sur les idées de Maxwell, H.-A. Lorentz avait établi une théorie analogue à celle du son et des harmoniques, mais non satisfaisante. En 1885, Balmer trouva pour H et pour d'autres éléments, une formule empirique, liant les positions des raies. Mais il fallait « expliquer » la *série de Balmer*. L'honneur en fut réservé à N. Bohr (1913). Il admet que les électrons décrivent des orbites circulaires sous l'influence de la force coulombienne et conformément à la dynamique classique. Mais il pose deux postulats : *a)* parmi l'infinité d'orbites mécaniquement possibles, seraient seules réalisables celles dont l'action (v. n° 9) est un nombre entier de quanta (condition étrangère aux orbites astronomiques) ; *b)* un électron venant à culbuter de son orbite « stationnaire », pour en suivre une autre, il y a variation d'énergie : perte s'il se rapproche du noyau ; d'où émission d'une onde électrique monochromatique, supposée de fréquence correspondante à la loi de Planck, et donc formation d'une raie déterminée ; l'absorption (d'un photon) donnerait lieu à une transition à une orbite plus grande. Ces hypothèses contredisent l'Électrodynamique de Maxwell, suivant laquelle un électron mobile émettrait *continuellement* une onde. De plus, la transition est inexpliquée et l'on ne voit pas pourquoi la fréquence répond aux quanta. Bohr, lui-même, a, dès le début, mis en relief le caractère provisoire de sa théorie.

De ses hypothèses, Bohr put, à l'aide du calcul, déduire avec une exactitude saisissante, la série de Balmer pour H et aussi les formules correspondantes pour d'autres séries (celles de Paschen, de Lyman, etc.). Il montra qu'une *constante*, dite de *Rydberg*, qui y figure, s'exprime en fonction

(1) Précieuse pour l'analyse chimique, la spectroscopie l'est encore davantage pour le progrès de la Physique théorique et céleste. Celle-ci n'existerait pas sans spectrométrie combinée à la photographie. On a enregistré à Harvard les spectres de plus de 350 mille étoiles ; d'où une statistique stellaire (W. Charlier, à Lund). — La technique spectrométrique atteint une telle précision, qu'on poursuit le projet de définir l'unité de longueur par une raie.

de h, de la masse et de la charge de l'électron. On put mener les calculs pour les séries optiques et pour les séries de Röntgen (1) des éléments successifs du système périodique. Le calcul des perturbations est plus compliqué qu'en Mécanique céleste ; il faut un mathématisme spécial, les orbites — en réalité elliptiques (Sommerfeld) — n'étant pas coplanaires. L'accord du calcul avec l'observation des raies émerveilla. Bohr put aussi expliquer l'*effet Zeeman* (1896), consistant en ce que les raies émises par une vapeur lumineuse dans un champ magnétique, se divisent en un nombre variable de composantes, dont l'écartement est fonction de l'intensité du champ (2). Analogue, l'effet Stark (1913) est produit par un champ électrique.

En vue d'être guidé dans ses calculs, Bohr posa le *principe de correspondance*, de profonde signification : si les électrons s'écartaient de plus en plus du noyau, les nombres quantiques (3) croissant indéfiniment, la théorie de Bohr convergerait vers les lois classiques, valables pour la matière macroscopique. Application de la méthode d'extension continue (cf. n° 2), ce principe impose une condition de validité à toute conception sur l'atome.

Dans l'atome H, l'électron est facilement arraché par un champ de forces extérieur, ce qui donne l'ion H, positif et très réactionnel. Au contraire, l'atome He (nombre atomique = 2) est très stable. Quant au Li, l'un de ses 3 électrons est facilement arrachable, son orbite étant « cométaire », c.-à-d. très allongée ; l'ion Li a donc une seule charge (positive).

(1) Leurs raies sont émises lors d'une culbute jusque près du noyau.

(2) Ajoutons que quand le champ est particulièrement intense, il se produit un *effet Zeeman anormal*, que la théorie de Bohr ne peut expliquer (v. n° 17). — Quand le pouvoir séparateur est très grand, les raies se décomposent en un grand nombre de raies fines. En appliquant la mécanique de la Relativité — mieux en harmonie avec l'électromagnétisme —, Sommerfeld (1915) put l'expliquer (la trajectoire de l'électron n'est plus alors rigoureusement fermée) et il prévit des particularités de cette *structure fine*. Impressionnante confirmation inattendue de la théorie d'Einstein !

(3) Chaque orbite exige quatre nombres quantiques pour être déterminée ; mais la théorie de Bohr n'en représente correctement que deux. Dans son exposé élémentaire, R. ne pouvait évidemment exposer la théorie, assez compliquée, de ces nombres, ni même les signaler.

Dans le Ne, très stable, les 10 électrons sont répartis sur deux *couches* (ou *niveaux)*, l'intérieure de 2, l'extérieure de 8, en disposition actinomorphe. Ayant 11 électrons, Na est au Ne, ce que Li est à He. L'atome Cl, s'adjoignant un électron, s'ionise négativement et Na Cl se produit quand, Na ayant cédé à Cl l'électron de valence, les deux ions se combinent. En général, la *n-valence* s'explique par l'aptitude à emprunter ou à céder un nombre *n* d'électrons qui manquent ou sont de trop pour la stabilité. En particulier, les alcalins sont monovalents, grâce à leur électron cométaire.

Dirac a découvert théoriquement le pivotement *(spin)* du noyau et des électrons extérieurs, analogue au mouvement diurne de la Terre. D'où la prévision — confirmée — de deux variétés d'H, suivant que les deux noyaux de la molécule tournent dans le même sens ou en sens inverse ; et l'on a réussi le fractionnement de l'H ordinaire (1) !

On voit que, par la théorie de Bohr, la Chimie, dans ses fondements, relève de la Physique. (De même, autrefois, la Thermologie, grâce au principe de Mayer) (n° 10). Bien entendu, pour la pratique, la Chimie reste science autonome.

Des vues nouvelles ont été développées également dans le domaine macroscopique. En soumettant l'agitation thermique aux lois quantiques de Bohr, on a pu expliquer le comportement des gaz à basse température. La quantification du mouvement rectiligne explique la conductivité des métaux pour la chaleur et l'électricité (Sommerfeld, 1927), ainsi que la supraconductivité (v. n° 12).

Applications aussi à la structure des cristaux. Exemple le plus simple : dans Na Cl, les ions occupent alternativement les sommets de cubes empilés, les 4 ions Na d'un cube élémentaire formant un tétraèdre, de même ceux de Cl (bien entendu, ce sont des positions moyennes). La molécule est ainsi devenue le cristal lui-même. Presque tous les cristaux ont été déterminés, grâce à des prodiges de science mathématique et à l'aide de la méthode de Laue (v. n° 8) : de la disposition des taches punctiformes de diffraction —

(1) Eucken, Bonhoeffer... — Ajoutons que les deux formes se trouvent dans l'H gazeux ordinaire, en proportion d'un à trois, conformément à la théorie pour l'équilibre des isomères.

p. ex. en disposition trifoliée pour la calcite —, on déduit l'architecture cristalline. La Cristallographie est ainsi devenue une branche « exacte » de la Physique et la Métallographie en a profité.

Durant une décade, la théorie de Bohr, grâce à des perfectionnements successifs, triompha dans tous les domaines et immenses sont les services qu'elle a rendus aux physiciens. — Mais, la spectrométrie acquérant une précision insoupçonnée, des divergences apparurent entre formules et observations. La théorie échoue dès qu'il y a interaction d'électrons, donc déjà pour He (1). On fit alors des hypothèses de plus en plus artificielles (demi-quantum !), on cultiva l'art diplomatique des compromis, sans pouvoir revenir à la belle concordance du début. On faisait fausse route. C'était la sanction de l'illogisme originel. Ce qu'il fallait, c'était une nouvelle conception fondamentale de la matière. Cela rappelle l'histoire des radiations. Analogie ? Non, équivalence !

Cette idée, c'est le prince L. de Broglie qui l'a exprimée le premier : il est l'initiateur, sinon le fondateur, de la Mécanique ondulatoire. Son but essentiel est de fondre la Dynamique avec une théorie des Ondes généralisée et, par suite, d'abattre les barrières qui séparaient la Physique de Newton (Physique atomique de la matière) de celle de Fresnel (Physique des radiations). La théorie de la Relativité avait préparé le terrain en montrant l'interdépendance des deux disciplines à unir. L. de Broglie pressentit que la dualité de nature corpuscule-onde, attribuée aux radiations (n° 9), devait l'être aussi à la matière. Entre les deux espèces de rayons corpusculaires (α, β, cathodiques et positifs) et ondulatoires (γ et X), la barrière est aujourd'hui abattue (2). Ainsi s'achève, dit R., le cycle hégélien (cf. n° 9).

Assurément personne n'aurait partagé une idée aussi

(1) R. nous semble manquer ici de précision. La théorie de Bohr a réussi dans le cas des systèmes à un seul électron planétaire : non seulement atome H neutre, mais aussi atomes He ou Li ionisés.

(2) Toutefois, entre le photon et l'électron, il y a des différences : celui-ci possède une masse et une charge électrique qui font défaut au proton, tandis que l'onde associée à ce dernier jouit de la propriété de polarisation que ne possède pas l'onde électronique.

hardie, si on n'avait réussi à la mathématiser. Partant des équations de la théorie quantique, en relation avec celles du mouvement relativiste des électrons, de Broglie parvint, par des opérations simples, à calculer les ondes électroniques. L'appareil mathématique est adéquat : forte présomption, sinon critère de la justesse de la thèse.

En 1926, la conception de l'onde associée fut développée avec grand succès, par E. Schrödinger. Il s'appuie sur la parenté hamiltonienne entre la Mécanique ancienne et l'Optique géométrique. Or, celle-ci n'est suffisante que si l'image et l'objet sont assez grands par rapport à λ. Schrödinger eut donc l'idée que la Mécanique classique n'est, elle aussi, valable que macroscopiquement et que, pour le micro-univers, elle doit être remplacée par la mécanique ondulatoire. Il réalisa pour les équations d'Hamilton la généralisation correspondant au passage de l'Optique géométrique à l'ondulatoire. Introduisant une équation aux dérivées partielles de propagation, il développa la mécanique ondulatoire, mais non relativiste. Ceux que rebute la Mathématique lui reprocheront son formalisme accentué. Mais ce qui fait la puissance de la Physique moderne, c'est justement l'analyse mathématique (1). De sa thèse, Schrödinger a pu déduire les conditions de quantification, ce qui émerveilla les physiciens.

Il conçut d'abord l'électron comme un « *Wellenpaket* », singularité de la structure du champ électrique entourant le noyau ; autrement dit, l'électron serait une accumulation de la densité électrique. Les ondes seraient donc la chose primitive. Cette interprétation séduisante est bien distincte de la conception dualistique de L. de Broglie.

Bientôt la théorie ondulatoire de la matière reçut une brillante confirmation expérimentale dans la *diffraction des électrons* par un cristal, phénomène (2) analogue à la diffrac-

(1) Comme le dit É. Picard, elle est une pièce essentielle dans l'édification de la philosophie naturelle.

(2) Prédit, en 1925, par W. Elsasser, dès que parut la thèse de L. de Broglie. C'est grâce à un accident de laboratoire que le phénomène fut réalisé par C. J. Davisson et L. H. Germer (1927). Ils projettent des électrons sur une face d'un cristal octaédrique de nickel. En 1928, J. P. Thomson (Aberdeen) utilise la « méthode

tion des rayons X (v. n° 8). Ce témoignage de la réalité des ondes électroniques a fait sensation, comme auparavant la découverte de Laue. L. de Broglie avait calculé que λ est ici du même ordre que dans le cas des rayons X, ce qui explique la réussite. Et la diffraction a bien lieu conformément à la mécanique ondulatoire.

En dépit de ce succès, l'interprétation ondulatoire de l'électron a dû être rejetée : par la diffraction, le « paquet d'ondes » serait détruit ; mais les équations se sont bien vérifiées et nous avons ici une théorie exacte revêtue d'une fausse représentation concrète (1).

Une autre conception a été développée par Max Born, W. Heisenberg et Bohr. L. de Broglie s'y est rallié. Seuls les corpuscules seraient l'élément physique, *dinglich*, de la matière, les ondes, conceptuelles *(begrifflich)*, étant des... probabilités ! Au premier abord, cela déconcerte. Mais on doit approfondir la théorie de la Connaissance physique, bien se pénétrer des relations entre la Pensée et l'Être. Nous y reviendrons dans un instant.

Sous l'impulsion d'Heisenberg et parallèlement à la mécanique ondulatoire, s'est développée, depuis 1925 (donc avant l'intervention de Schrödinger), la « Nouvelle Mécanique des Quanta » (2). Sch. a montré, peu après, l'équivalence mathé-

des poudres cristallines » (de Debye et Sherrer), ce qui élimine certaine erreur. Il faut citer ensuite : S. Kikuchi et S. Nishikawa (1928), M. Ponte (1929). En 1929, E. Rupp, à Göttingen, a pu obtenir la diffraction par un réseau mécanique ! Récemment (1930), H. Mark et R. Wierl la réalisent en faisant traverser par un faisceau cathodique un jet de vapeur organique. Enfin A. J. Dempster, de Chicago, vient d'obtenir la *diffraction des protons*.

(1) Ce qui importe le plus, ce sont les équations, formes dans lesquelles les phénomènes viennent se loger. La Physique participe ainsi à la rigueur mathématique. Bien qu'utiles pour la recherche, les représentations concrètes n'ont pas de valeur au point de vue de la connaissance stricte. (H. Poincaré a enseigné qu'un système déterminé d'équations peut se prêter à une infinité d'interprétations, sans que l'on soit jamais assuré, parmi elles, de discerner la meilleure. Il ajoutait que cela n'aurait même pas de sens.) Les interprétations constituent la partie périssable des théories, dont il ne reste que les formes abstraites. Exemple frappant : l'évolution des idées sur l'éther, de Fresnel à Einstein (v. n° 8).

(2) D'apparence plus abstraite que la mécanique ondulatoire, la nouvelle mécanique quantique s'en distingue en utilisant une

matique entre celle-ci et la mécanique ondulatoire (1). Cette nouvelle mécanique quantique rend compte des phénomènes atomiques. En particulier, la « théorie de la résonance des électrons » (due à Heisenberg) résout le problème du spectre de l'He et des atomes plus compliqués.

C'est par des considérations très radicales que Heisenberg fut conduit à sa conception statistique des ondes. Un modèle imaginé à notre échelle, peut-il être fidèle ? Non, dit-il. La notion usuelle d'observation physique perd son sens précis dans le microcosme (2). « Cela ne gêne pas la Lune qu'on la regarde, mais l'électron s'offusque d'être observé » (Eddington). En effet, pour observer un corpuscule il est nécessaire d'établir, par un agent physique, une interaction entre ce corpuscule et le monde extérieur dont fait partie l'observateur ; d'où une perturbation de l'objet. Ainsi, pour des électrons, il faudrait les « éclairer » par une radiation à faible λ, par exemple par les rayons γ, et les

algèbre non-commutative à une infinité de variables. Ce n'est plus par des nombres ordinaires que sont représentées les grandeurs physiques. Celles liées à l'atome étant observables lors des transitions (n° 16), Heisenberg considère d'emblée une matrice infinie d'éléments imaginaires correspondant chacun à une raie du spectre. Leur caractère imaginaire permet aux éléments de représenter les intensités des raies par leurs modules et les fréquences par leurs arguments. Pour le calcul (symbolique) de ces matrices, la multiplication est non-commutative. H. Weyl (1928) montre que le substratum mathématique se trouve dans la notion de groupe. Remarquons enfin que la tendance de Heisenberg, contrairement à celle de L. de Broglie, est plus phénoménologique qu'explicative. L'œuvre de Heisenberg est comparable à celle d'Einstein en ce qu'elle possède un caractère accentué de critique constructive.

(1) La fusion a été achevée dans les travaux de P. Dirac, qui, par ses *q-numbers*, a approfondi la théorie des matrices de Heisenberg. Ensuite, il a encore généralisé les équations de Schrödinger et en a déduit le *spin* (n° 16). Théorie extrêmement transcendante, presque mystérieuse, mais peut-être d'une haute signification philosophique. A la base des phénomènes physiques, dit Eddington, nous devons nous attendre à trouver des entités qui, comme beaucoup de choses qui existent dans notre conscience, ne sont pas mesurables par des nombres.

(2) A l'échelle macroscopique, il existe aussi des cas où il est impossible d'observer sans altérer (coloration d'une plaque photographique, température, etc.)

photographier avec un microscope *ad hoc*. Mais les rayons utilisés ayant de forts quanta d'énergie, les électrons subiront un effet de Compton violent qui les culbutera de leur orbite.

En 1927, Heisenberg a pu démontrer « qu'aucune expérience, si parfaite soit-elle, ne pourrait assigner rigoureusement à la fois deux quantités conjuguées », p. ex. la position et la vitesse d'un électron. Il y a une indétermination, non pas accidentelle et due à l'imperfection de nos procédés de mensuration, mais essentielle et résultant d'une grande loi de la Nature. Eddington l'estime aussi importante que la loi de Relativité. Le produit des imprécisions de deux quantités conjuguées est constant et vaut à peu près *h* (*Ungenauigkeitsrelation*). Plus précise est la détermination d'une d'elles, moins exactement sera connue l'autre (1). Il est logiquement impossible de prédéterminer le mouvement subatomique, parce qu'il est physiquement impossible de fixer les conditions initiales. A l'échelle atomique, le déterminisme n'existe pas ; il y règne une certaine anarchie. Imprécision signifie probabilité. La succession des états des corpuscules est régie, non par des *lois causales*, mais par des *lois statistiques*, décrites par des *Wahrscheinlichkeitswellen*, ondes dont le carré de l'amplitude ou « intensité » mesure la probabilité de localisation du corpuscule dans l'élément de volume de l'espace-temps. Ces simples représentations symboliques et analytiques sont *zuständliches*.

On ne peut dire que cette conception soit pleinement satisfaisante. Le mécanisme de l'émission et de l'absorption de la radiation par l'atome est resté inexpliqué (2). Il semble

(1) C'est, dit Eddington, comme les bonshommes des jouets-baromètres : quand l'un apparaît à la première porte, l'autre disparaît derrière la seconde. La Nature fait que la connaissance de la moitié du monde assure l'ignorance de l'autre moitié.

(2) Ajoutons trois remarques. « La mécanique ondulatoire a conduit à la confusion », dit É. Sevin. Il développe, lui, une théorie physique antirelativiste, basée sur l'idée, de S. Newcomb, que notre Univers serait enveloppé, dans le sens d'une quatrième dimension spatiale, par une pellicule d'éther. — Idée en sens inverse : ne pourrait-on géométriser à la fois matière et radiation, en se basant sur la géométrie non-archimédienne ? La Relativité a établi la finitude de l'Univers dans le sens du Grand ; on soupçonne une

que notre représentation des corpuscules soit encore trop influencée par notre macroscopisme. (R. est ici du même avis que Langevin). On a découvert la *clef* d'un cryptogramme du microcosme, mais on n'a pu en comprendre le *langage*.

R. croit le moment assez proche où sera dévoilée la structure de la matière, énigme peut-être la plus profonde de la nature physique.

Abordons la IVe PARTIE, brèves considérations sur « les conséquences de la Physique moderne en Philosophie naturelle ». Traitons d'abord de la Causalité et de la Probabilité (n° 18).

Les Grecs avaient notion d'une certaine prédétermination, mais leur *Fatum* ne répond pas à la conception causale ou déterministe de la Physique (1). Œdipe tuera son père, mais les circonstances ne sont pas fixées.

Caténation aveugle, la causalité physique a pour symbole la machine. Le déterminisme est né de l'étude serrée de la Nature, étude qui a imposé le concept mathématique de *fonction*. Sans le concept de loi rigide, la confiance eût manqué et la marche triomphale de la Science n'eût pas eu lieu. Le déterminisme a reçu de Laplace une expression célèbre : pour une intelligence infinie et omnisciente, tous les événements tiennent en une seule formule qui fait connaître l'état de l'univers à n'importe quel instant.

En ce qui concerne les phénomènes biologiques, récemment le vitalisme, déjà soutenu par Aristote, a dû être remis en question. Néanmoins, la vraie crise du déterminisme, c'est la plus exacte des sciences de la Nature, c'est la Physique, qui l'a provoquée. La nouvelle Mécanique des Quanta, en 1927, a renversé la causalité stricte, qui était le trait caractéristique le plus profond de l'enseignement de

« limitation » du côté du Petit. — Enfin, pour SIR JEANS (Mysterious Universe, Cambridge 1930, p. 125), notre continuum espace-temps ne serait qu'une projection (quadridimensionnelle) d'une réalité qui occupe plus de quatre dimensions.

(1) La question du déterminisme scientifique a cependant été posée par l'École pythagoricienne.

Newton et que supposait l'épistémologie courante (1). Cette année-là marque dans l'évolution des sciences (2).

A vrai dire, cette profonde révolution dans notre savoir fut en gestation durant le dernier siècle. Il fut découvert que la loi de croissance de l'entropie (n° 10) est une loi de probabilité. De même, d'autres grandes lois auxquelles on attribuait le caractère de lois rigides et qui ont assuré le triomphe provisoire du déterminisme, ont apparu, après examen approfondi, être plutôt d'ordre statistique. La régularité que nous observons dans la Nature n'est que l'effet de la loi des grands nombres, cachant un chaos moléculaire(3). L'imperfection de nos mesures nous empêche de l'observer. D'où le déterminisme apparent des phénomènes macroscopiques. Mais, atome, il nous serait impossible de discerner un ordre quelconque : à cette échelle, le hasard est le maître. Cette thèse est combattue par les kantistes.

L'étude a été poursuivie par une critique philosophique

(1) Le déterminisme ne renaîtra pas, dit Eddington, qui semble bien d'accord avec R. Mais Einstein, lui (26 mars 1927) espère — ainsi que Planck et Langevin — qu'on pourra rétablir l'accord entre la réalité physique et la stricte causalité. Eddington reconnaît que maintenant « nous ne pouvons plus distinguer nettement le naturel du surnaturel et la porte est ouverte aux démons du sauvage. » Rapprochons ceci de H. Poincaré (1911) : « La science est déterministe, par définition... Un monde où le déterminisme ne régnerait pas, serait fermé aux savants... Tant que la science sera imparfaite, la liberté conservera une petite place... Or, la science sera toujours imparfaite, et non seulement parce que nos facultés sont débiles, mais par définition... »

(2) Dans la Physique dite primaire par Eddington, la causalité était stricte ; mais cette science ne discriminait pas cause et effet, la relation causale étant symétrique et ignorant l'irréversibilité du temps. Dans la Physique moderne, par contre, le temps a une flèche : il y a « causation » (E.) ; mais la causalité n'y est plus stricte.

(3) Jeans (1928) a traité la question de savoir s'il n'y aurait pas aussi un chaos stellaire. — Langevin repousse l'idée de chaos, qui proviendrait, dit-il, de ce que nous avons mal posé les problèmes. Mais on peut faire l'objection suivante : Heisenberg a montré l'interdépendance de la relation d'incertitude avec la relation

$$pq - qp = h : 2\pi i,$$

« relation de permutation » qui est fondamentale en statistique quantique.

du concept de probabilité (1). Laplace, en 1812, soutient la thèse subjectiviste. Ce qui condamne cette théorie, c'est qu'elle est incapable d'expliquer la validité de la loi des grands nombres, vérifiée dans la *statistique*. Déjà, en 1843, Cournot l'avait remarqué : le surhomme laplacien ne renoncerait pas à utiliser les lois statistiques. Le concept de probabilité et le concept causal ne sont pas opposés ; le second n'aurait même pas de sens s'il ne revenait au premier. On ne constate pas toujours, dans la Nature, l'obéissance à des lois rigoureuses et c'est à tort qu'on impute la divergence exclusivement à l'imperfection de nos mesures. Un moyen d'accroître la probabilité P d'une prédiction, c'est de passer aux grands nombres ; un autre, c'est de tenir compte, de mieux en mieux, des divers facteurs influents ; mais on a cru jusqu'ici qu'ainsi P convergerait vers la certitude. C'est faux, a prouvé Heisenberg. Il y a des limites objectives, que même le surhomme laplacien ne pourrait franchir : il devrait se contenter d'un « probable ».

« La question de savoir si une connaissance complète du passé peut permettre de prédire l'avenir ne se pose pas, dit Heisenberg, parce que la connaissance complète du passé implique en elle-même une contradiction. ». Nous avons l'intuition que l'avenir est capable de mettre au jour des facteurs décisifs qui ne sont pas cachés dans le passé et nous avons le sentiment net d'une certaine liberté, ce qui est en contradiction avec le déterminisme (2). Aujourd'hui, on entrevoit la possibilité d'une solution. Mais R. croit qu'il faut de nouvelles méthodes philosophiques, en relations très

(1) La bibliographie est donnée, à peu près complète, par R. dans l'article « Ziele... » (*l. c.*), n° 22. — La causalité, dans ses relations avec la probabilité, a été discutée au Congrès philosophique de Prague, en 1929. Voir dans *Erkenntnis*, 1930, fasc. 2/4, les articles de : H. Hahn, O. Neurath, P. Frank, H. Reichenbach, R. v. Mises, P. Hertz, F. Waismann, H. Feigl, A. Fraenkel, R. Carnap. Voir aussi « Das Kausalproblem in der Physik », article substantiel et profond de H. REICHENBACH, apud *Naturwissenschaften*, n° du 21 août 1931, pp. 117-122.

(2) Suivant M. Planck, il n'y aurait pas contradiction : il croit l'avoir démontré.

étroites avec l'investigation moderne de la Nature (1). Recherchant la formation de concepts physiques, elles devraient approfondir le problème de la Connaissance (2).

Quelques mots, enfin, sur « la vision du monde et la réalité » (nº 19) (3). La Physique procède d'une synthèse de deux systèmes philosophiques opposés : l'*empirisme* et l'*idéalisme*. De l'observation, on passe aux lois par *induction*, procédé fréquent dans la recherche moderne. La légitimation de cette méthode — base du mode de pensée empirique, que Duhem désapprouvait — est l'un des plus difficiles problèmes que se pose la Philosophie naturelle. Bien entendu, on ne se borne pas à généraliser et l'on fait un travail théorique approfondi.

Dans l'investigation de la Nature, les sensations reçues par l'esprit n'ont pas à être placées dans un cadre déterminé *a priori* par la Raison. Car fausse est la doctrine kantienne que la pensée imposerait ses lois aux choses et que celles-ci graviteraient autour de celle-là. L'objet de la Physique consiste uniquement en ceci : de faits observés, en prévoir d'autres, grâce à la découverte de relations entre eux. Le physicien doit débarrasser, autant que possible, les phénomènes de tout ce que l'observateur y met de subjectif. Tout autre est le rôle de l'artiste ! Sa fantaisie se joue dans un monde enchanté qui passe toute réalité objective. Pour le physicien, l'anthropomorphisme est la faute capitale. Libre aux hommes d'art de regretter cette « exanimation », cette « *Entmenschlichung* » (4) de la Nature. Le physicien est loin de nier que la conception artistique ait sa propre

(1) Voir, page 352 de ce volume de *Revue*, l'analyse de l'ouvrage que R. vient de faire paraître au sujet de la nouvelle *Naturphilosophie*.

(2) On consultera les études parues dans *Erkenntnis*.

(3) C'est le principal objet de l'ouvrage d'Eddington : « The Nature of Physical World », 1928. Agréable à lire, ce livre expose des idées philosophiques originales, s'éloignant parfois assez fort de celles du présent livre de R. ; mais celui-ci est plus rigoureusement scientifique, plus aussi que le récent ouvrage de J. Jeans (Mysterious Universe), dont la lecture est cependant recommandable.

(4) Pourrait-on traduire moins mal que par « déshumanisation », qui est détestable ?

valeur (1), mais il lui interdit l'accès dans un domaine qui doit lui rester étranger (2).

Dans le développement récent de la Physique, un rôle des plus importants est joué par l'analyse critique des notions anciennes et par la construction de notions fondamentales nouvelles. Les idées qui paraissaient les mieux fondées ont été débarrassées d'une grande partie de l'*a priori* qu'elles contenaient.

Les recherches de notre génération l'ont révélé : les concepts d'espace et de temps, d'une part, de substance et de causalité, d'autre part, ne s'appliquent pas, sans restrictions, respectivement aux macro- et micro-univers. Immense est l'étape ainsi franchie par la Physique moderne : elle a détruit le réseau de concepts dans lequel la philosophie kantienne voulait enfermer l'investigation de la Nature. Suivant ce système, de ce que nos instruments sont euclidiens, il serait contradictoire de s'en servir pour trancher la question de l'euclidité de l'espace. Cet *apriorisme*, qui a joué un grand rôle en Philosophie, est encore soutenu par la majorité des épistémologistes, bien qu'il soit réfuté par la Physique. Certes, nos observations ne portent jamais, en réalité, que sur des objets à notre échelle, que nous sondions les profondeurs du Cosmos (télescope) ou le monde atomique (thermo- et manomètres) ; mais on ne doit pas récuser de tels témoignages. Vu l'échelle de nos instruments d'astronomie, on peut, sans erreur appréciable, les supposer euclidiens ; et cela ne nous interdit pas de les utiliser pour conclure à la non-euclidité de l'espace. De même pour le micro-univers et le principe causal. Les anciennes catégories de Kant sont devenues caduques, définitivement.

C'est la méthode d'extension continue qui a fait attribuer aux macro- et microcosme des structures toutes différentes— correspondant à la Relativité et aux Quanta—, mais structures qui viennent à coïncider avec celle des dimensions moyennes, adoptée jusqu'à présent. La construction de la

(1) Eddington (*l. c.*) se plaît à insister sur cette valeur.

(2) Pour la même raison, la Physique s'est laïcisée complètement. La Physique ionienne correspondait déjà à un stade de laïcisation par rapport à la Physique égyptienne. Newton ne parle plus de « démons » : il parle de « gravitation ».

géométrie non-euclidienne, par Riemann, en postulant l'euclidité dans l'infiniment petit (v. n° 2), et le principe de correspondance de Bohr (n° 16) : voilà deux applications de cette méthode. Par elle, la Physique a acquis une grande puissance de généralisation, qu'elle met à profit dans les nouvelles théories.

C'est un immense service qu'a rendu la Physique moderne en élargissant, par l'étude de la Nature, les cadres traditionnels de la Pensée. Et Reichenbach termine en disant que celui qui l'a compris aura tiré profit de cette étude.

On peut dire que cet auteur a réussi admirablement à mettre en évidence, dans son ouvrage, le mode de penser de la Physique d'à-présent. Il a, en même temps, le grand mérite d'être parvenu à donner l'essentiel d'un domaine gigantesque, en un excellent exposé élémentaire, s'adressant à un public très large. La seule partie, peut-être, où certains lecteurs auront pu avoir difficile de saisir la pensée, c'est dans la Relativité ; mais cela tient au sujet et l'on ne saurait en faire grief à l'auteur. Enfin, Reichenbach aura largement contribué à provoquer la réflexion philosophique et à répandre l'amour de la Science, ce qui est un grand bienfait.

Et nous terminerons par une belle pensée de l'illustre Ch. Richet : « La Science donne plus que la joie suprême intellectuelle de connaître. Elle apporte l'imprévu, l'inattendu ; la révélation de quelques-uns de ces phénomènes merveilleux qui frémissent autour de nous, et que nous ne savons pas voir. Notre débile intelligence ne peut pas pénétrer les vérités incluses dans les choses. Elle est incapable d'imaginer même un fragment de ce que la Science va lui dévoiler un jour ».

Not accessioned
Astron
L
Author Lecat, Maurice
Title Atome et cosmos.

University of Toronto
Library

DO NOT
REMOVE
THE
CARD
FROM
THIS
POCKET

Acme Library Card Pocket
Under Pat. "Ref. Index File"
Made by LIBRARY BUREAU